

На правах рукописи



Ванюков Вячеслав Владимирович

**НЕЛИНЕЙНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА
ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ОГРАНИЧЕНИИ МОЩНОСТИ
В СУСПЕНЗИЯХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ижевск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте механики Уральского отделения Российской академии наук
(ИМ УрО РАН)

Научный руководитель: **Михеев Геннадий Михайлович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Соболев Валентин Валентинович,**
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный
технический университет им. М.Т. Калашникова»,
профессор

Новодворский Олег Алексеевич,
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник
ФГБУН «Институт проблем лазерных и
информационных технологий Российской академии
наук», заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО "Башкирский государственный
университет"

Защита состоится «26» _____ декабря _____ 2013 г. в ____14⁰⁰____ часов на заседании
диссертационного совета ДМ 212.275.03 при ФГБОУ ВПО «Удмуртский
государственный университет» по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская,
д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного
университета.

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Крылов Пётр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию нелинейного рассеяния света при оптическом ограничении мощности (ООМ) в суспензиях многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) и детонационных наноалмазов (ДНА).

Актуальность работы

Исследование ООМ в наноматериалах представляет интерес с точки зрения создания эффективных ограничителей мощности лазерного излучения для защиты светочувствительных объектов от воздействия мощных световых потоков. Суспензии наноуглеродных материалов привлекают внимание исследователей тем, что они могут работать в качестве оптического ограничителя мощности в широком диапазоне длин волн.

К настоящему времени в мире опубликовано достаточно большое количество работ по исследованию ООМ в различных материалах и суспензиях углеродных наночастиц. Обычно в экспериментах по ООМ используется, так называемая, техника *Z* – сканирования, при которой исследуется коэффициент пропускания, например, кюветы с исследуемой суспензией в зависимости от ее положения относительно перетяжки сфокусированного лазерного пучка. При этом коэффициент пропускания кюветы может зависеть от нелинейного поглощения, нелинейной рефракции и нелинейного рассеяния. Зондирование маломощным излучением дополнительного лазера области взаимодействия показало, что основным механизмом, ответственным за ООМ в суспензиях УНТ, является нелинейное рассеяние света на паровых пузырьках, возникающих при передаче углеродным материалом своей поглощённой энергии жидкости, а также при сублимации наночастиц углерода (см., например, L. Vivien et. al. *Carbon*, **40**, 1789, 2002 г.).

Несмотря на достаточно большое количество работ, опубликованных по ООМ в различных материалах, в литературе практически отсутствуют работы, посвящённые исследованию ООМ в суспензиях наноалмазов, в частности, детонационных наноалмазов, синтезируемых из углерода сильных взрывчатых веществ. Ввиду отработанной технологии, позволяющей получать ДНА в большом количестве, и возможности получения их стабильных суспензий (см. А. П. Пузырь и др. *Физика твёрдого тела*, **46**, 4, 2004 г.), актуальной задачей является проведение исследований взаимодействия лазерного излучения с суспензиями ДНА в режиме ООМ для определения возможности их использования для создания эффективных ограничителей мощности лазерного излучения.

Обзор и анализ мировой научной литературы показывает отсутствие разработанных методик экспериментальной физики, позволяющих определять корреляции между уменьшением коэффициента пропускания и возрастанием интенсивности рассеянного излучения в процессе *Z* – сканирования при исследовании ООМ в наноуглеродных материалах. Не известны работы по исследованию амплитудных и временных характеристик импульсного излучения, возникающего в процессе нелинейного рассеяния при ООМ в суспензиях УНТ и ДНА. Между тем, проведение таких исследований важно с точки зрения создания методики управления длительностью лазерных импульсов.

Таким образом, налицо актуальность сформулированной темы данной диссертационной работы, направленной на изучение физических явлений и процессов, возникающих при ООМ в суспензиях УНТ и ДНА.

Целью работы является исследование нелинейного рассеяния света при ООМ в суспензиях УНТ и ДНА для разработки оптических ограничителей мощности, работающих в широком спектральном диапазоне, и методики управления длительностью наносекундных лазерных импульсов.

Для достижения намеченной цели решались **следующие задачи**:

1. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования амплитудных и временных параметров падающих, проходящих и рассеянных световых импульсов наносекундной длительности при ООМ в суспензиях углеродных наночастиц техникой Z – сканирования на длинах волн 532, 1064 и 1400÷1675 нм.
2. Экспериментальное исследование амплитудных и временных параметров рассеянных и проходящих через исследуемые суспензии световых импульсов при ООМ.
3. Разработка методики управления длительностью лазерных импульсов, основанной на технике Z – сканирования суспензий УНТ и ДНА в режиме нелинейного поглощения и нелинейного рассеяния света.
4. Экспериментальное исследование влияния концентрации ДНА в суспензиях на ООМ лазерного излучения.
5. Экспериментальное исследование влияния размерного фактора ДНА в суспензиях на ООМ и нелинейное рассеяние света.

Научная новизна результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Впервые показано, что временные параметры рассеянного под прямым углом импульсного излучения лазера наносекундной длительности на длине волны 1064 нм в режиме ООМ в водной суспензии УНТ сложным образом зависят от интенсивности падающего излучения. В частности, длительность нелинейно рассеянных импульсов короче, а их пик отстаёт по времени от пика импульса падающего излучения лазера.
2. Впервые экспериментально продемонстрировано, что сканирование кюветы с суспензией УНТ и ДНА вдоль оптической оси сфокусированного пучка излучения лазера наносекундной длительности на длинах волн 532 и 1064 нм в режиме ООМ позволяет плавно регулировать длительность проходящих через суспензию лазерных импульсов.
3. Впервые показано, что при увеличении среднего размера наноалмазных частиц от 50 до 320 нм пороговая мощность ООМ лазерного излучения наносекундной длительности на длине волны 532 нм в суспензиях ДНА уменьшается, а интенсивность нелинейного рассеяния света возрастает. Нарастание интенсивности нелинейного рассеяния при ООМ с увеличением плотности энергии падающего излучения происходит по биекспоненциальному закону.
4. Впервые установлено, что для заданной интенсивности импульсного лазерного излучения наносекундной длительности на длине волны 1064 нм существует

оптимальная концентрация наноалмазных частиц в их водной суспензии, при которой эффективность ООМ максимальна.

Практическая значимость работы

Установленные закономерности амплитудных и временных параметров падающих, проходящих и рассеянных световых импульсов наносекундной длительности на длинах волн 532, 1064 и 1400÷1675 нм в суспензиях УНТ и ДНА могут быть использованы при разработке оптических ограничителей мощности, работающих в широком спектральном диапазоне, для защиты глаз и фотоприёмных устройств, а также для создания устройств для плавного регулирования длительности наносекундных лазерных импульсов.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач применялись методы нелинейной оптики, лазерной физики, осциллографирования фотоэлектрических импульсов, оптической спектроскопии, рентгенофазового анализа, а также просвечивающей и растровой электронной микроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Временные параметры нелинейно рассеянных лазерных импульсов наносекундной длительности в суспензиях УНТ сложным образом зависят от интенсивности падающих световых импульсов.
2. Ограничение проходящей через суспензии УНТ и ДНА лазерной мощности при увеличении мощности падающего импульсного излучения наносекундной длительности на длинах волн 532 и 1064 нм происходит за счёт нелинейного поглощения и нарастания нелинейного рассеяния света.
3. Сканирование оптической кюветы с водными суспензиями УНТ и ДНА вдоль оптической оси сфокусированного пучка лазера в режиме ООМ приводит к плавному изменению длительности наносекундных лазерных импульсов, проходящих через суспензию.
4. При увеличении среднего размера наночастиц пороговая мощность ООМ в суспензиях ДНА уменьшается, а интенсивность нелинейного рассеяния света возрастает.
5. Эффективность ООМ в суспензиях ДНА носит немонотонный характер от концентрации. Оптимальная концентрация ДНА, при которой отношение экстинкций суспензии в фокусе лазерного пучка и вдали от него максимально, зависит от интенсивности падающего излучения.
6. В диапазоне длин волн 1400÷1675 нм эффективность ООМ в суспензиях ДНА при увеличении длины волны уменьшается.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы докладывались на Шестой международной научно-практической конференции «Нанотехнологии-производству-2009», (Россия, Фрязино, 2009); Восьмой всероссийской школе-конференции молодых учёных «КоМУ-2010», (Россия, Ижевск, 2010); Девятой всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем», (Россия, Ижевск, 2010); 14th international conference on «Laser optics 2010», (Russia, Saint-Petersburg, 2010); Second international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics», (Finland, Polvijärvi, 2010); International conference on coherent and

nonlinear optics «ICONO 2010» / International conference on laser, applications, and technologies «LAT 2010», (Russia, Kazan, 2010); Третьей международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии», (Россия, Ижевск, 2011); Forty six annual meeting of the finnish physical society «Physics day 2012», (Finland, Joensuu, 2012); Third international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics», (Finland, Polvijärvi, 2012); CFN summer school on «Nano-photonics», (Germany, Bad Herrenalb, 2012); Fourth international conference «Nanocon 2012», (Czech Republic, Brno, 2012); Joensuu summer school on «Tissue optics and measurements in biophotonics», (Finland, Joensuu, 2013); 23rd Jyvaskyla summer school on «Optical and electronic properties of carbon nanotubes and graphene», (Finland, Jyvaskyla, 2013); 6th finnish-russian photonics and laser symposium «PALS'13», (Finland, Kuopio, 2013); семинарах в институтах «Istitut d'electronique fondamentale» (France, Orsay, 2013); «Foundation for research and technology-Hellas» (Greece, Heraclion, 2013 г.); «Institute of photonics University of Eastern Finland» (Finland, Joensuu, 2011-2013).

Работа поддерживалась грантами «Участие в 14 международной конференции «Laser optics 2010» («Конкурс научных проектов молодых учёных для представления на научных мероприятиях, проводимых в России», проект РФФИ №10-02-16039, 2010 год); «Исследование оптоэлектрических и нелинейно-оптических свойств углеродных наноструктур и их суспензий» (УрО РАН и СО РАН, интеграционный проект №102, 2010 год); «Исследование влияния поляризации излучения на нелинейное рассеяние света и оптическое ограничение мощности в суспензиях наноуглеродных частиц» («Конкурс научных проектов молодых учёных и аспирантов УрО РАН», проект №10-1-НП-245, 2011 год); «Трэвел грант для поездки в Istitut d'electronique fondamentale» («Erasmus staff exchange support», 2013 год); «Оптические и нелинейно-оптические явления в наноалмазах детонационного синтеза» (проект РФФИ 13-02-96016 p_урал_a, 2013 год); «Участие в научной школе «The 2013 lectures in physics and chemistry: nanoscience and nanotechnology» («Onassis public benefit foundation», 2013 год).

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается применением современных точных приборов и инструментов, использованием апробированных и обоснованных методов, тщательностью проведённых измерений, воспроизводимостью результатов экспериментов. Анализ экспериментальных данных проведён с соблюдением критериев достоверности статистических испытаний и физических измерений.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Постановка задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов выполнены совместно с соавторами опубликованных работ при непосредственном участии соискателя.

Публикации

Материалы диссертационной работы полностью отражены в 23 научных работах, в том числе 9 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации, в 1 патенте РФ на изобретение и в 13 тезисах докладов конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка принятых в работе сокращений и списка цитируемой литературы. Материал работы изложен на 174 страницах, включающих 60 рисунков. Список цитированной литературы содержит 155 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

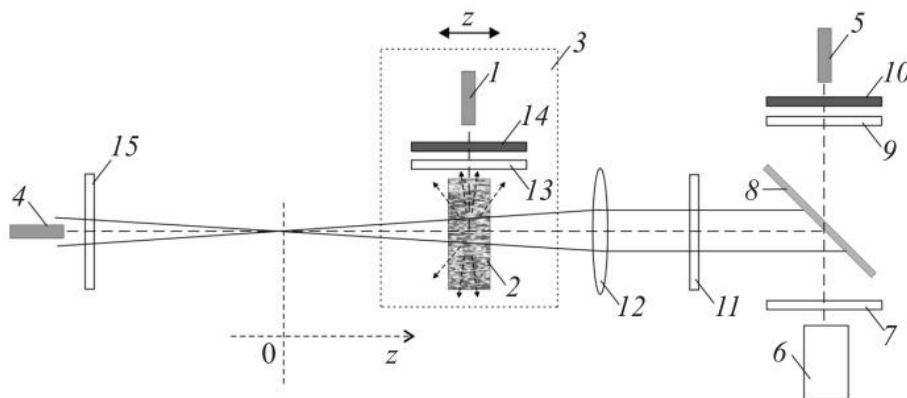
Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы.

В главе 1 «Оптическое ограничение мощности в суспензиях наноуглеродных частиц. Линейное и нелинейное рассеяние света» представлен обзор литературных данных по ООМ в суспензиях углеродных наночастиц, а также линейному и нелинейному рассеянию света. Глава состоит из пяти разделов. *Первый раздел* посвящён явлению ООМ. *Второй* - описанию нелинейных механизмов, вызывающих возникновение явления ООМ. *Третий* - линейному рассеянию света. *Четвёртый* - нелинейному рассеянию света. *Пятый* - нелинейному рассеянию света в суспензиях углеродных наночастиц.

Глава 2 посвящена описанию методов и техники эксперимента, используемых в данной работе. Описаны методики получения многослойных УНТ, ДНА и их стабильных суспензий, являющихся объектом исследования настоящей диссертационной работы. УНТ были получены и аттестованы в Институте неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (лаб. профессора Окотрубца А. В.). Для получения многослойных УНТ использовался метод электродугового испарения графита. Для придания УНТ способности образовывать устойчивые суспензии в воде и для очистки УНТ от наночастиц стеклоуглерода, образец был подвергнут химической обработке. В результате окисления многослойных УНТ в растворе перманганата калия в серной кислоте на поверхности наночастиц сформировались кислородсодержащие группы, которые обеспечивают образование коллоидного раствора УНТ в воде. Полученные водные суспензии УНТ являются стабильными в течение весьма продолжительного времени (более 1 года). ДНА были получены из коммерческого порошка наночастиц, производимого в ООО «Реал Дзержинск» (Россия), и поставлялись из Института биофизики СО РАН (А. П. Пузырь, В. С. Бондарь, лаб. нанобиотехнологии и биолюминесценции). Первичные частицы ДНА (средний размер около 4.5 нм) были объединены в агрегаты различных размеров и подвергались модифицированию. Модификацию проводили обработкой агрегатов ДНА, предварительно суспендированных в деионизованной воде, с помощью ультразвукового воздействия раствором NaCl с целью снижения поверхностных примесей и для получения ДНА с высокой коллоидной устойчивостью. По данным дифракционной картины рентгеновских лучей и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, полученные ДНА не отличаются от общеизвестных наноалмазов. Приготовление водных суспензий ДНА заданной концентрации осуществлялось простым

добавлением к навеске порошка ДНА необходимого объёма деионизованной воды. При этом ультразвуковая обработка не осуществлялась. Полученные водные суспензии ДНА при хранении показали высокую коллоидную устойчивость во времени (более 3 лет).

В главе 2 «Техника эксперимента» также представлено описание разработанных и созданных экспериментальных установок для исследования амплитудных и временных параметров световых импульсов при ООМ в суспензиях углеродных наночастиц техникой Z – сканирования. На базе YAG:Nd³⁺ – лазера с пассивной модуляцией добротности с преобразователем излучения во вторую гармонику, а также параметрического генератора света, накачиваемого первой и второй гармониками YAG:Nd³⁺ – лазера с электрооптической модуляцией добротности, разработаны и созданы экспериментальные установки, позволяющие проводить эксперименты по ООМ на длинах волн 532, 1064 и 1400÷1675 нм. В созданных установках для проведения экспериментов была использована разработанная нами модернизированная техника Z – сканирования. На Рисунке 1 показана оптическая схема установки по исследованию временных параметров световых импульсов при ООМ.



1, 4, 5 – места расположения быстродействующих фотоприёмников; 2 – кювета с исследуемой суспензией; 3 – координатный стол; 6 – источник лазерного излучения; 7, 13 – оптические фильтры ИКС-6; 8 – делительное зеркало; 9, 11, 15 – нейтральные фильтры; 10, 14 – матовые стекла, 12 – фокусирующая линза с фокусным расстоянием 100 мм

Рисунок 1 – Оптическая схема установки по исследованию временных параметров световых импульсов при ООМ

Созданные экспериментальные установки позволяли исследовать амплитудные и временные параметры падающего, проходящего, а также рассеянного под прямым углом импульсов света в ходе перемещения кюветы вдоль оптической оси z , за начало которой была принята перетяжка сфокусированного лазерного пучка.

В главе 3 «Нелинейное рассеяние света при оптическом ограничении мощности в суспензиях углеродных нанотрубок» изложены результаты экспериментов по исследованию амплитудных и временных параметров рассеянных и проходящих через исследуемые суспензии УНТ световых импульсов при ООМ на длине волны 1064 нм.

На Рисунке 2, а представлены формы импульсов для падающего и прошедшего через исследуемую суспензию УНТ излучения, а также рассеянного

излучения под прямым углом для различных значений z при энергии падающего светового импульса $E_{in} = 1.5$ мДж. Изображённый на Рисунке 2, а падающий импульс (форма падающего импульса представлена под цифрой 1) представляет собой импульс лазера, прошедший через суспензию в режиме отсутствия ООМ. Для удобства представления временных задержек, амплитудные значения импульсов приведены к единице. Хорошо видно, что при уменьшении z (т.е. при увеличении плотности энергии в импульсе) происходит уменьшение временной доли лазерного импульса, проходящей через кювету. Чем меньше z , тем меньшая временная доля падающего импульса проходит через исследуемую суспензию. Очевидно, что вся оставшаяся часть импульса либо поглощается, либо рассеивается суспензией.

В соответствии с экспериментальными результатами, полученными при $E_{in} = 1.5$ мДж и представленными на Рисунке 2, б, формы импульсов, рассеянных под прямым углом, существенно отличаются от форм проходящих импульсов.

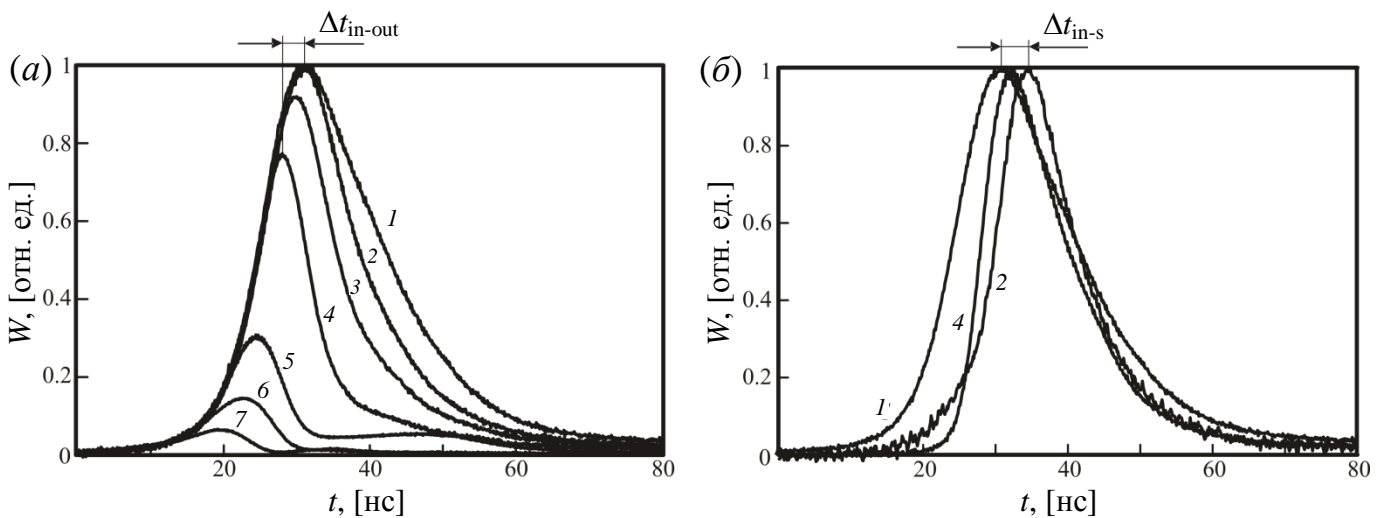


Рисунок 2 - Формы импульсов света (зависимости мгновенной мощности излучения W от времени t) на выходе оптической кюветы с исследуемой суспензией при $z = 32$ (2), 24 (3), 17 (4), 7 (5), 4 (6), 0 мм (7) (а), а также формы импульсов света, рассеянных под прямым углом при $z = 32$ (2), 17 мм (4) и падающего импульса (1) лазера (б), полученные при $E_{in} = 1.5$ мДж

Когда кювета с исследуемой суспензией находится на некотором расстоянии от перетяжки пучка лазера, например, в точке с координатой $z = 32$ мм, пик светового импульса, рассеянного под прямым углом и имеющего длительность 13 нс, отстает по времени от пика падающего импульса на временную задержку $\Delta t_{in-s} = 3.2$ нс (Рисунок 2, б, кривая 2). При длительности импульса лазерного излучения по полувысоте 18 нс (Рисунок 2, б, кривая 1) такая временная задержка является существенной. Таким образом, возникновение и нарастание импульса, рассеянного под прямым углом, происходит с некоторой временной задержкой относительно падающего импульса.

Исследования влияния интенсивности падающего света I на временные и амплитудные параметры нелинейно рассеянных лазерных импульсов показали (см. Рисунки 3 и 4), что возрастание амплитуды A рассеянных импульсов при увеличении I на начальном этапе происходит по степенному закону (Рисунок 3, вставка, сплошная кривая), а на некотором отрезке для больших I зависимость $A(I)$ (см. Рисунок 3) можно аппроксимировать линейной функцией.

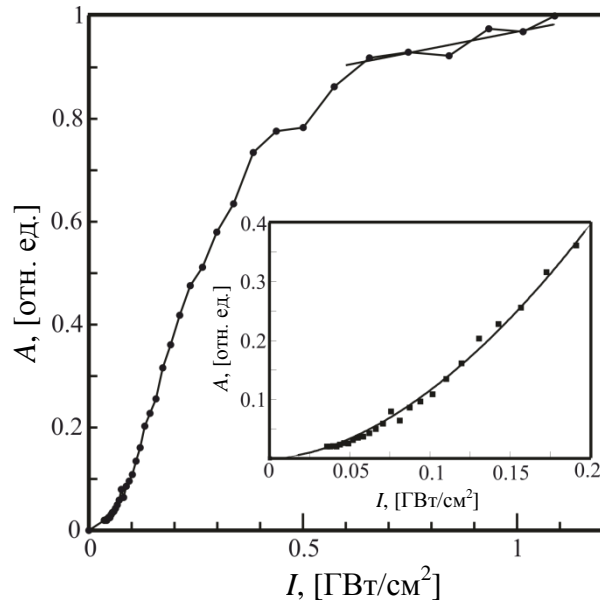


Рисунок 3 - Зависимость амплитуды A рассеянных под прямым углом импульсов от интенсивности падающего света I : прямой отрезок – линейная аппроксимация при $I > 0.6$ ГВт/см²; сплошная кривая (вставка) – аппроксимирующая функция $A = k_1 I + k_2 I^{1.8}$ при $P < 0.2$ ГВт/см², где k_1, k_2 – параметры аппроксимации

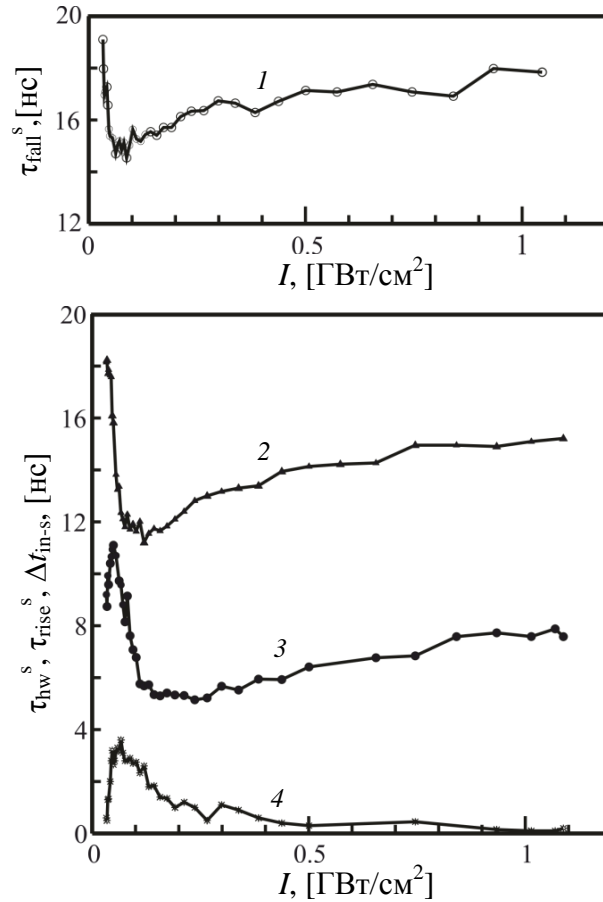


Рисунок 4 - Зависимости времени спада τ_{fall}^s (1), длительности τ_{hw}^s (2), времени нарастания τ_{rise}^s (3) рассеянных под прямым углом световых импульсов, а также временной задержки пика рассеянных импульсов $\Delta t_{\text{in-s}}$ (4) относительно пика падающих лазерных импульсов от интенсивности падающего света I

Рисунок 4 показывает, что временные параметры τ_{rise}^s , τ_{fall}^s , τ_{hw}^s и $\Delta t_{\text{in-s}}$ рассеянных импульсов сложным образом зависят от интенсивности падающих световых импульсов. Полученные результаты находятся в согласии с механизмом термоиндуцированного нелинейного рассеяния света, возникающего при ООМ в исследуемой суспензии. Видно, что временная задержка $\Delta t_{\text{in-s}}$ при интенсивности падающих световых импульсов около 60 МВт/см^2 максимальна, а длительность τ_{hw}^s рассеянных импульсов при интенсивности около 100 МВт/см^2 минимальна и примерно в 1.5 раза короче длительности падающих световых импульсов.

На Рисунке 5, а представлены формы лазерных импульсов, прошедших через кювету с суспензией УНТ, для различных координат z при фиксированной энергии падающих импульсов $E_{\text{in}} = 0.3 \text{ мДж}$. Для сравнения на том же рисунке представлена форма падающего лазерного импульса (кривая 1) с учётом его линейного ослабления суспензией. Его длительность по полувысоте составляет $\tau_{\text{hw}}^{\text{in}} = 16 \text{ нс}$. При приближении кюветы к перетяжке пучка длительность проходящих импульсов $\tau_{\text{hw}}^{\text{out}}$ уменьшается и для $z = 0$ (кривая 4) составляет 10 нс. Из рисунка хорошо видно, что уменьшение $\tau_{\text{hw}}^{\text{out}}$ происходит за счет «обрезания» спада импульса. Уменьшение длительности проходящих импульсов при уменьшении $|z|$ сопровождается соответствующим уменьшением амплитуды проходящих световых импульсов (Рисунок 5, б), т.е. соответствующим уменьшением импульсной мощности. Аналогичные результаты по управлению длительностью импульсов были получены и для суспензий ДНА.

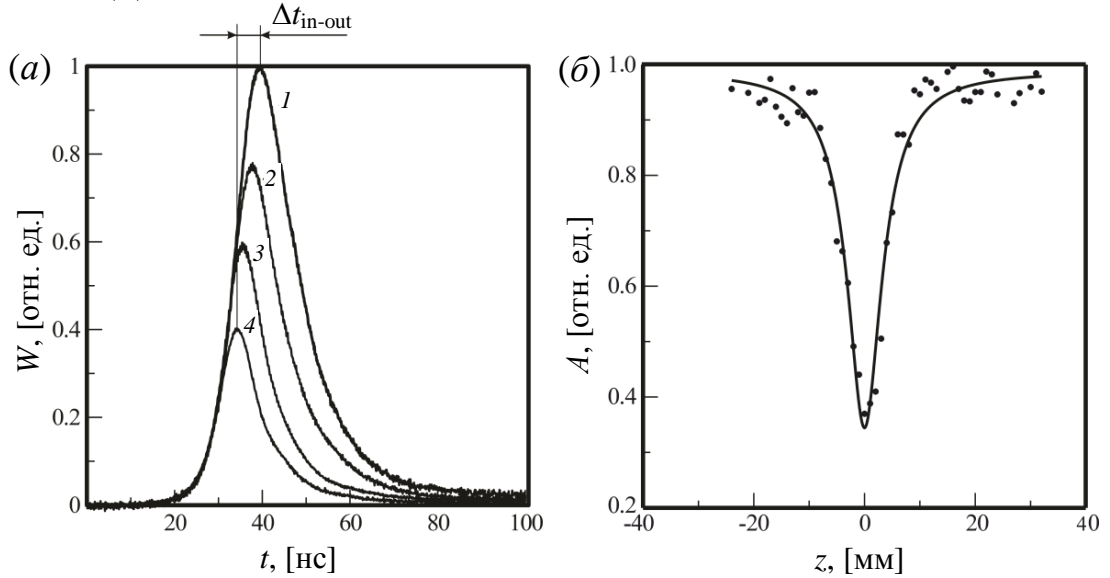


Рисунок 5 - Форма лазерных импульсов на выходе оптической кюветы с суспензией УНТ при $z = 0$ (4), 5 (3), 11 мм (2), а также форма падающего импульса лазера с учётом его линейного ослабления суспензией (1), полученные при $E_{\text{in}} = 0.3 \text{ мДж}$ (а); зависимость амплитуды A проходящих импульсов от координаты z (б), точки – эксперимент, кривая – аппроксимация функцией, аналогичной функции (1)

Длительности $\tau_{\text{hw}}^{\text{out}}$ лазерных импульсов на выходе кюветы с суспензией в зависимости от координаты z описываются следующей функцией

$$\tau_{\text{hw}}^{\text{out}}(z) = \tau_{\text{hw}}^{\text{in}} \frac{\ln(1 + E_{\text{in}} q / (1 + x^2))}{E_{\text{in}} q / (1 + x^2)}, \quad (1)$$

где τ_{hw}^{in} – длительность падающих импульсов,

q – коэффициент, характеризующий сечение нелинейного рассеяния света,

$x = z/Z_0$, Z_0 – рэлеевская длина.

Формула (1) позволяет приблизительно определять длительность лазерных импульсов в зависимости от z при заданном значении энергии импульса лазера E_{in} .

Таким образом, на основе техники Z – сканирования суспензий УНТ и ДНА в режиме ООМ разработана методика управления длительностью лазерных импульсов. С ее помощью показано, что сканирование кюветы с водной суспензией УНТ вдоль оптической оси сфокусированного пучка лазера на длине волны 1064 нм позволяет получать плавно регулируемые световые импульсы в диапазоне от 16 до 10 нс.

Четвёртая глава «Оптическое ограничение и нелинейное рассеяние света в суспензиях наноалмазов» диссертации посвящена экспериментальным результатам исследования ООМ и нелинейного рассеяния света в суспензиях ДНА на длинах волн 532, 1064 и 1400÷1675 нм. Глава состоит из пяти разделов.

В *первом разделе* описано исследование влияния нелинейного рассеяния на ООМ в суспензиях ДНА. В экспериментах использовалось излучение YAG:Nd³⁺ – лазера на длине волны 1064 нм. Исследования проводились с использованием модернизированной техники Z – сканирования, позволяющей одновременно регистрировать энергии падающих, проходящих, а также рассеянных под прямым углом импульсов излучения. Энергия падающих световых импульсов E_{in} составляла 0.7 мДж. В экспериментах концентрация ДНА в исследуемых суспензиях составляла 3% (по массе). Кластеры частиц имели средний размер около 50 нм.

На Рисунке 6 представлены экспериментально полученные зависимости энергии импульсов излучения E_s , рассеянного под углом 90°, и коэффициента пропускания T исследуемой суспензии от координаты z в ходе сканирования суспензии ДНА вдоль оптической оси. Энергия импульсов рассеянного излучения нормирована на максимальное значение.

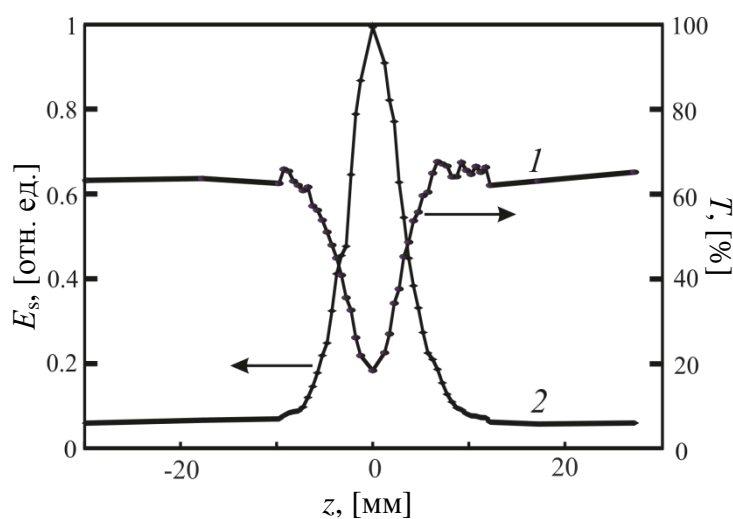


Рисунок 6 – Экспериментальные зависимости нормированного на максимальное значение энергии импульсов света E_s , рассеянных под прямым углом (кривая 2), и коэффициента пропускания T кюветы с исследуемой суспензией (кривая 1) от координаты z

Из рисунка 6 видно, что при приближении z к нулю, следовательно, при увеличении плотности энергии импульсов падающего излучения, коэффициент пропускания исследуемой суспензии существенно уменьшается (Рисунок 6, кривая 1), а энергия импульсного излучения E_s , рассеянного под прямым углом, соответственно возрастает (Рисунок 6, кривая 2). При $|z| \geq 10$ мм энергия импульса лазера, рассеянного под прямым углом, не обращается в нуль и примерно остаётся на постоянном уровне, что объясняется линейным рассеянием света.

Уменьшение пропускания, наряду с нарастанием нелинейного рассеяния света, происходит также и за счет нелинейного поглощения. Аналогичные результаты, полученные для суспензий УНТ, изложены в предыдущей главе. Оценки показывают, что вклад нелинейного поглощения в суспензиях УНТ на ООМ составляет не менее 10 %.

Во *втором разделе* главы приведено исследование влияния размерного фактора ДНА в суспензиях на ООМ и нелинейное рассеяние света. В экспериментах исследовались три суспензии ДНА L (320), M (110) и S (50) с одинаковой концентрацией 0.03 % по массе, отличающиеся по гранулометрическому составу (в скобках приведён средний размер кластеров в нм). Исходные коэффициенты пропускания суспензий L , M и S в кювете толщиной 1.06 мм на длине волны 532 нм составляли 0.54, 0.73 и 0.87, соответственно. В экспериментах использовалось YAG:Nd^{3+} – излучение с длиной волны 532 нм. Для плавного изменения плотности энергии P_{in} падающих световых импульсов использовались плавное варьирование энергией лазерных импульсов с помощью полуволновой пластины и поляризатора, а также техника Z – сканирования.

На Рисунке 7, *а* представлены полученные выходные-входные зависимости плотностей энергий P_{out} (P_{in}) для кюветы, заполненной дистиллированной водой (кривая DW) и исследуемых суспензий L , M , S . Видно, что для воды зависимость P_{out} (P_{in}) описывается прямой. Зависимости P_{out} (P_{in}), полученные для суспензий ДНА (кривые L , M , S), демонстрируют проявление эффекта ООМ.

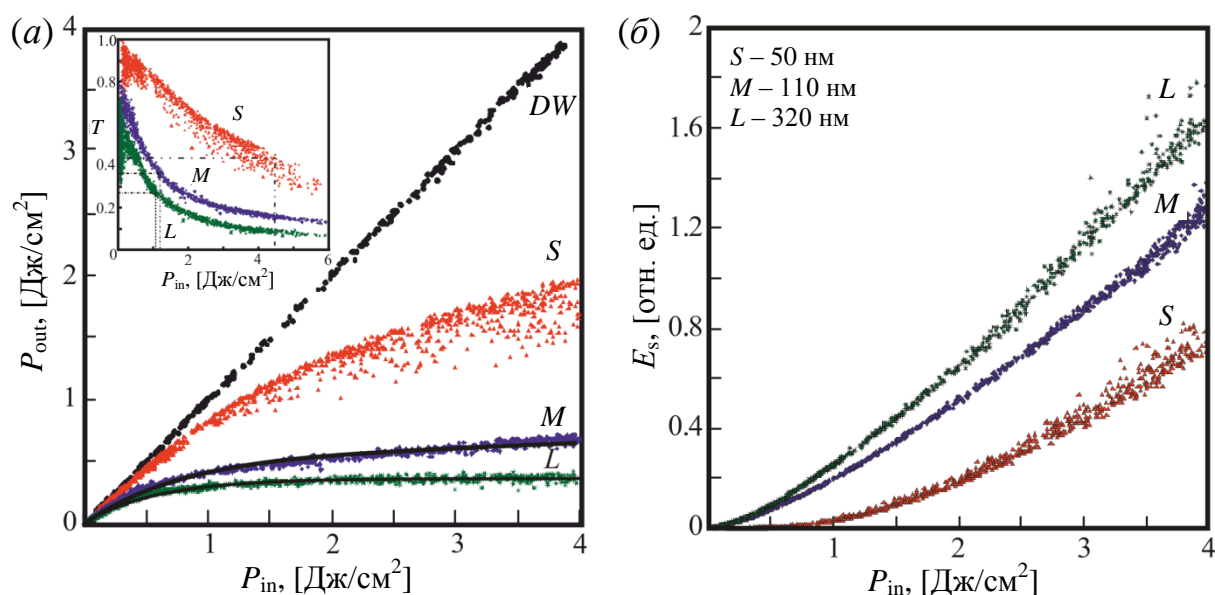


Рисунок 7 – Зависимости проходящей плотности энергии P_{out} (*а*), коэффициента пропускания T (вставка), а также энергии рассеянных импульсов E_s (*б*) от плотности энергии P_{in} падающих импульсов для суспензий L , M , S со средними размерами наночастиц 320, 110 и 50 нм, соответственно; зависимость DW соответствует дистиллированной воде

При малых значениях P_{in} увеличение светового потока на входе кюветы с указанными суспензиями приводит к соответствующему пропорциональному возрастанию P_{out} . При дальнейшем увеличении P_{in} пропорциональное нарастание выходного сигнала прекращается и P_{out} стабилизируется на некотором уровне. Зависимости E_s от P_{in} отличаются противоположной закономерностью. Для любого

фиксированного значения P_{in} , чем больше характерный размер ДНА, тем больше уровень рассеянного излучения (Рисунок 7, б). Экспериментальные данные, представленные на Рисунке 7, а, позволяют получать зависимости коэффициентов пропускания T исследуемых суспензий от P_{in} . Эти зависимости, нормированные на соответствующие линейные коэффициенты пропускания (см. вставку к Рисунку 7, а), позволяют определять пороговые значения $P_{in} = P_{thr}$, при которых коэффициенты пропускания уменьшаются в два раза. Найденные значения порогов ООМ для суспензий L , M и S составили 1.1, 1.2 и 4.5 Дж/см², соответственно. Таким образом, установлено, что при одинаковой концентрации наночастиц ДНА в суспензии с увеличением их среднего размера порог ООМ уменьшается, а эффективность нелинейного рассеяния света возрастает.

Нелинейный характер рассеянного излучения хорошо проявляется в зависимостях $\eta = E_s / P_{in}$ от P_{in} (Рисунок 8), непосредственно полученных из экспериментальных результатов, приведённых на Рисунке 7, б.

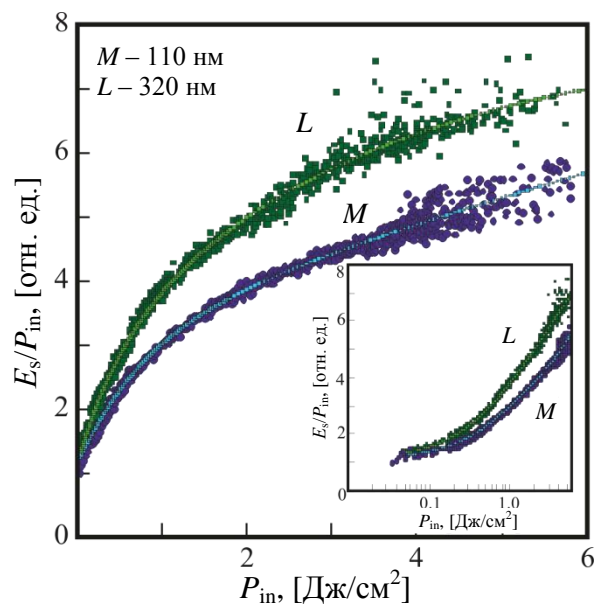


Рисунок 8 – Зависимости отношения энергии рассеянных лазерных импульсов под прямым углом E_s к плотности энергии падающих импульсов P_{in} от P_{in} для суспензий L и M со средними размерами кластеров частиц 320 и 110 нм в линейном и логарифмическом (вставка) масштабах по оси абсцисс

Те же самые зависимости E_s / P_{in} от P_{in} , построенные в логарифмический шкале оси абсцисс (Рисунок 8, вставка), показывают, что при $P_{in} \rightarrow 0$ отношение E_s / P_{in} стремится к постоянной величине η_0 , зависящей от исследуемой суспензии. Чем больше характерный размер ДНА, тем больше η_0 . Иными словами, это означает, что сечение линейного рассеяния возрастает при увеличении размеров частиц суспензии. Зависимости η от P_{in} для суспензий M и L хорошо аппроксимируются функцией, являющейся суммой двух экспоненциальных членов, в следующем виде

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 [1 - \exp(-\eta_2 P_{in})] + \eta_3 [1 - \exp(-\eta_4 P_{in})], \quad (2)$$

где η_1 , η_2 , η_3 , η_4 - некоторые коэффициенты, зависящие от размерного фактора наночастиц, составляющих суспензию. Формула (2) свидетельствует о сложном механизме нелинейного рассеяния в суспензиях ДНА.

Устойчивость исследуемых суспензий ДНА к периодическому лазерному воздействию исследовалась при воздействии на них 8000 лазерных импульсов интенсивностью 0.2 ГВт/см², следующих с частотой повторения 1 Гц. При этих условиях все три суспензии работали в режиме ООМ и располагалась в фокусе, т.е. в точке с координатой $z = 0$. В экспериментах для каждой вспышки лазера определялись нелинейный коэффициент пропускания $T_{z=0} = E_{out} / E_{in}$ и энергия импульса рассеянного света, нормированная на энергию импульса падающего излучения, $D_{z=0} = E_s / E_{in}$. На Рисунке 9 представлены зависимости T и D от числа

вспышек лазера, полученные в результате усреднения измеряемых величин T и D по 50 вспышкам лазера, соответственно. Из Рисунка 9, *а* видно, что коэффициенты нелинейного пропускания $T_{z=0}^L$ и $T_{z=0}^M$ суспензий L и M , соответственно, после воздействия 8000 вспышек лазера в пределах ошибок эксперимента остаются неизменными. Этот же коэффициент $T_{z=0}^S$ для суспензии S после соответствующего лазерного воздействия возрастает от своего первоначального значения на 20%. Заметное возрастание $T_{z=0}^S$ суспензии S сопровождается соответствующим уменьшением энергии рассеянных лазерных импульсов (Рисунок 9, *б*, кривая S), которая для суспензий M и L в пределах ошибки остаётся неизменной.

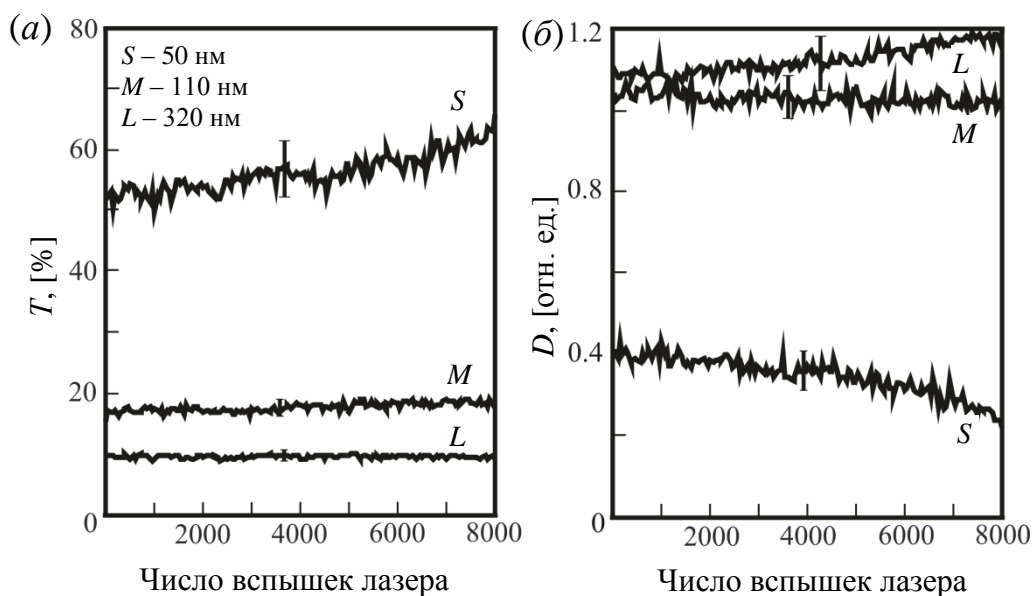


Рисунок 9 - Зависимости коэффициента нелинейного пропускания T (*а*), а также энергии рассеянных импульсов, нормированных на энергию падающих лазерных импульсов, D (*б*) от числа вспышек лазера для суспензий ДНА L , M и S со средними размерами кластеров 320, 110 и 50 нм, соответственно; вертикальные ограничительные отрезки показывают стандартные отклонения экспериментальных данных от средних значений

Таким образом, исследуемые суспензии ДНА показали высокую устойчивость к периодическому лазерному воздействию, увеличивающуюся со средним размером частиц, и продемонстрировали способность стабильно работать в качестве оптических ограничителей мощности в течение продолжительного времени в поле лазерных импульсов с интенсивностью 0.2 ГВт/см^2 .

В *третьем разделе* приведено экспериментальное исследование влияния концентрации ДНА в суспензиях на нелинейное рассеяние света и ООМ. Исследования выполнены с суспензиями ДНА со средним размером кластеров 50 нм и концентрациями $C = 0.01 \div 3$ масс. %. На Рисунке 10 представлены экспериментальные зависимости T и E_s от координаты z в ходе сканирования кювет с суспензиями ДНА с концентрациями $C = 3$ (*а*), $C = 1$ (*б*), $C = 0.1$ (*в*) и $C = 0.01$ масс. % (*г*) вдоль оптической оси. Исследования проводились на длине волны излучения $\lambda = 1064 \text{ нм}$ при фиксированной энергии падающих импульсов лазера 1.1 мДж. Частота повторения импульсов составляла 1 Гц. В экспериментах использовалась модернизированная техника Z – сканирования.

Из Рисунка 10 видно, что во всех случаях при приближении z к нулю, следовательно, при увеличении плотности энергии падающего излучения, коэффициент пропускания T исследуемой суспензии существенно уменьшается, а энергия импульсного излучения E_s , рассеянного под прямым углом, соответственно возрастает, т.е. чем больше E_s , тем меньше коэффициент пропускания T .

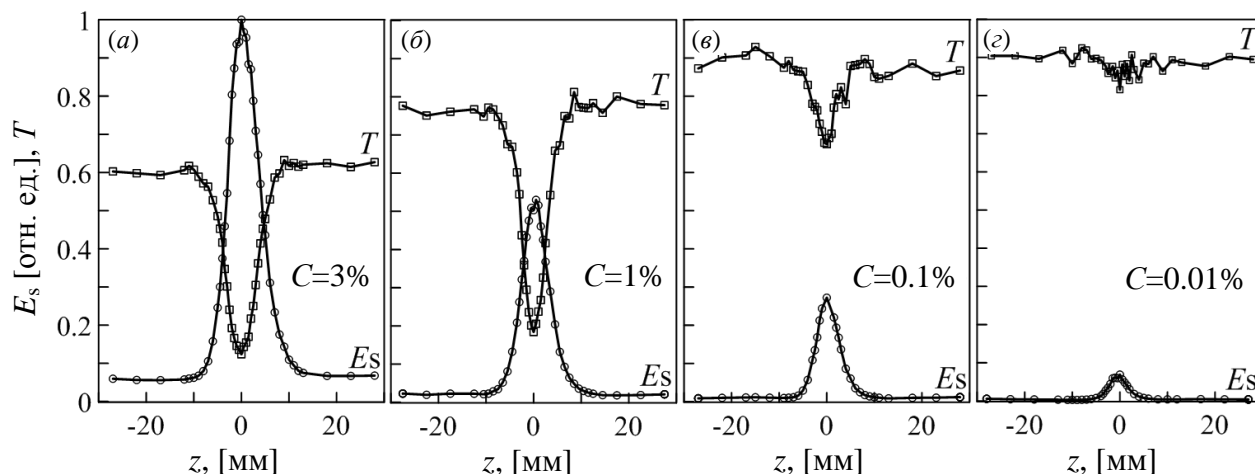


Рисунок 10 - Зависимости энергии лазерных импульсов E_s (\circ), рассеянных под прямым углом, и коэффициентов пропускания T (\square) оптической кюветы с суспензией ДНА от координаты z для концентраций C наночастиц 3 масс. % (а), 1 масс. % (б), 0.1 масс. % (в) и 0.01 масс. % (г), полученные при энергии импульсов лазера 1.1 мДж

Представленные на Рисунке 10 результаты показывают, что ООМ в суспензиях ДНА наблюдается в широком диапазоне концентраций ДНА. Из рисунка хорошо видно, что уменьшение концентрации ДНА в исследуемых суспензиях приводит к уменьшению энергии рассеянных импульсов, т.е. к ослаблению ООМ.

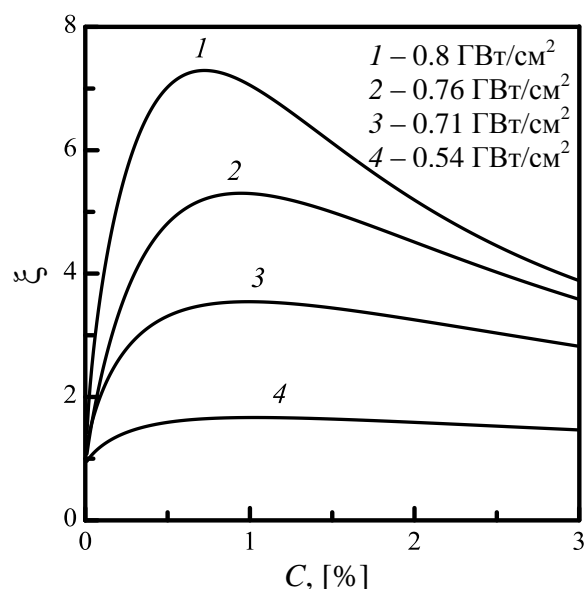


Рисунок 11 - Зависимость эффективности ООМ ξ от концентрации ДНА в суспензии для интенсивностей падающего излучения 0.8 (1), 0.76 (2), 0.71 (3), и 0.54 ГВт/см² (4)

Представляет интерес нахождение оптимальной концентрации C_{opt} частиц ДНА в суспензии, при которой эффективность ООМ максимальна. На Рисунке 11 представлена зависимость эффективности ООМ ξ , определяемой соотношением $\xi(C) = \ln(T_{z=0}) / \ln(T_{z=25\text{mm}})$, при различных интенсивностях падающего излучения от концентрации частиц ДНА в суспензиях.

Из Рисунка 11 видно, что зависимость эффективности ООМ от концентрации частиц носит немонотонный характер. Хорошо видно, что оптимальная концентрация частиц ДНА в суспензии, соответствующая максимуму зависимости $\xi(C)$, зависит от интенсивности падающего излучения.

Таким образом, для заданной геометрии эксперимента и мощности лазерного излучения на входе кюветы существует оптимальная концентрация наночастиц, при которой эффективность ООМ максимальна. Для лазерных импульсов на длине волны 1064 нм и плотностью мощности 0.8 ГВт/см^2 оптимальная концентрация частиц ДНА в суспензии оптической толщиной в 1 мм оставляет 0.7 масс. %.

В *четвёртом разделе* приведены исследования влияния поляризации лазерного излучения на ООМ и нелинейное рассеяние света. На примере исследования ООМ в суспензиях ДНА показано, что нелинейное рассеяние в суспензиях нанокремнезёмных частиц существенно зависит от поляризации падающего излучения. Изменение поляризации не влияет на коэффициент нелинейного пропускания, но существенно изменяет диаграмму рассеянного излучения в плоскости, перпендикулярной падающему пучку.

В *пятом разделе* приведены исследования ООМ в суспензиях ДНА в ближней инфракрасной области. В экспериментах использовалось излучение параметрического генератора света на длине волны $1400 \div 1675 \text{ нм}$. В экспериментах, проводимых с использованием техники Z – сканирования, при энергии падающих импульсов 0.2 мДж концентрация ДНА в исследуемых суспензиях составляла 3 и 6 масс. %. В виду сильного поглощения дистиллированной водой излучения, длиной волны $1400 \div 1675 \text{ нм}$, в качестве дисперсной среды использовалась тяжёлая вода.

На Рисунке 12 представлены экспериментально полученные зависимости нормированного коэффициента пропускания суспензии ДНА с концентрацией 6% в тяжёлой воде от координаты z в диапазоне длин волн $1400 \div 1675 \text{ нм}$.

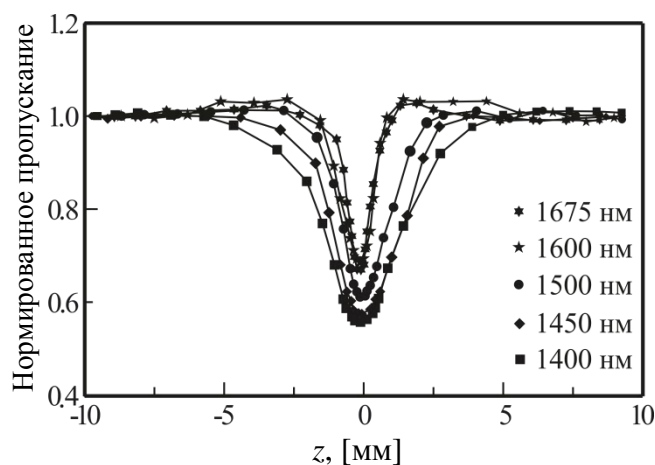


Рисунок 12 – Зависимость нормированного пропускания суспензий ДНА с концентрацией 6 % в тяжёлой воде от положения z при энергии падающих импульсов лазера 0.2 мДж

Из рисунка видно, что ослабление проходящего излучения наблюдается во всем диапазоне исследуемых длин волн, а значит, суспензии ДНА в тяжёлой воде могут быть использованы в качестве оптических ограничителей мощности в ближней инфракрасной области. Из рисунка видно, что с увеличением длины волны падающих световых импульсов эффективность ООМ уменьшается.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны и созданы экспериментальные установки для исследования амплитудных и временных параметров падающих, проходящих и рассеянных световых импульсов при ООМ в суспензиях углеродных наночастиц техникой Z – сканирования на длинах волн 532, 1064, 1400÷1675 нм.
2. Экспериментально показано, что длительность, время нарастания и спада, а также временное положение пика рассеянного под прямым углом импульсного излучения лазера наносекундной длительности на длине волны 1064 нм в режиме ООМ в водной суспензии УНТ сложным образом зависят от интенсивности падающего излучения.
3. Разработана методика управления длительностью лазерных импульсов, основанная на технике Z – сканирования суспензий УНТ и ДНА в режиме нелинейного поглощения и нелинейного рассеяния света. С помощью разработанной методики показано, что сканирование кюветы с водной суспензией УНТ вдоль оптической оси сфокусированного пучка лазера на длине волны 1064 нм позволяет получать плавно регулируемые световые импульсы в диапазоне от 16 до 10 нс. Укорочение длительности импульсов происходит за счет «обрезания» спада импульса.
4. Показано, что уменьшение коэффициента нелинейного пропускания суспензий ДНА и УНТ при ООМ происходит за счет нелинейного поглощения и нарастания нелинейного рассеяния света.
5. Показано, что при одинаковой концентрации наночастиц порог ООМ в суспензии ДНА уменьшается, а эффективность нелинейного рассеяния света возрастает с увеличением среднего размера наночастиц. Продемонстрировано, что суспензии ДНА способны стабильно работать в качестве оптических ограничителей мощности в течение продолжительного времени в поле лазерных импульсов с интенсивностью 0.2 ГВт/см², следующих с частотой повторения 1 Гц.
6. Установлено, что ООМ в водных суспензиях ДНА наблюдается в широком диапазоне концентраций 0.01÷3 масс %, причём для заданной геометрии эксперимента и мощности лазерного излучения на входе кюветы существует оптимальная концентрация наночастиц, при которой эффективность ООМ максимальна. Для лазерных импульсов на длине волны 1064 нм и интенсивностью 0.8 ГВт/см² оптимальная концентрация составляет 0.7 масс. % при оптической толщине суспензии 1 мм.
7. Показана возможность использования суспензий ДНА в тяжёлой воде для ООМ наносекундных лазерных импульсов в диапазоне длин волн 1400÷1675 нм. Установлено, что в указанном диапазоне длин волн эффективность ООМ уменьшается с увеличением длины волны.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК

1. Михеев, Г. М. Нелинейное рассеяние света в суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, А. В. Окотруб, Д. Л. Булатов, В. В. Ванюков // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 1. – С. 45–50.

2. Михеев, Г. М. Формы световых импульсов при нелинейном рассеянии лазерного излучения в водной суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, А. В. Окотруб, В. В. Ванюков // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 5. – С. 1–10.
3. Михеев, Г. М. Нелинейное рассеяние света в гидрозоле наноалмазов / Г. М. Михеев, А. П. Пузырь, В. В. Ванюков, К. В. Пуртов, Т. Н. Могилева, В. С. Бондарь // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 8. – С. 23–32.
4. Михеев, Г. М. Регулирование длительности наносекундных лазерных импульсов с помощью суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, В. В. Ванюков, А. В. Окотруб // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 6. – С. 81–84.
5. Могилева, Т. Н. Влияние концентрации наноалмазов в гидрозольях на оптическое ограничение мощности лазерного излучения / Т. Н. Могилева, А. П. Пузырь, В. В. Ванюков, Г. М. Михеев, К. В. Пуртов, В. С. Бондарь // Нанотехника. – 2010. – Т. 4. – № 24. – С. 47–51.
6. Могилева, Т. Н. Оптическое ограничение мощности в водороде и суспензиях наноуглеродных частиц при нелинейном рассеянии света / Т. Н. Могилева, В. В. Ванюков, Г. М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14. – № 2. – С. 296–304.
7. Vanyukov, V. V. Application of nonlinear light scattering in nanocarbon suspensions for adjustment of laser pulse duration / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. V. Okotrub, D. L. Bulatov // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2012. – Vol. 7. – № 1. – P. 102–106.
8. Михеев, Г. М. Влияние размерного фактора наноалмазов в суспензиях на оптическое ограничение мощности и нелинейное рассеяние лазерного излучения / Г. М. Михеев, А. П. Пузырь, В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, В. С. Бондарь // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 5. – С. 1–10.
9. Vanyukov, V. V. Size effect on the optical limiting in suspensions of detonation nanodiamond clusters / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52. – № 18. – P. 4123–4130.

Патент РФ

10. Пат. РФ на изобретение №2410737, МПК G02F 1/00, B82B 1/00. Рабочее вещество ограничителя интенсивности мощного оптического излучения и способ его приготовления / А. П. Пузырь, В. С. Бондарь, К. В. Пуртов, Г. М. Михеев, В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева; заявл. 28.12.2009; опубл. 27.01.2011. Бюл. №3. – 9 с.

В других изданиях

11. Ванюков, В. В. Формы проходящих и рассеянных импульсов лазера при оптическом ограничении в водной суспензии многослойных углеродных нанотрубок / В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, Г. М. Михеев, А. В. Окотруб // Шестая международная научно-практическая конференция «Нанотехнологии – производству - 2009». – Фрязино: Изд-во «Янус-К», 2009. – С. 121–122.
12. Ванюков, В. В. Получение лазерных импульсов различной длительности с помощью суспензий углеродных нанотрубок / В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, Г. М. Михеев, А. В. Окотруб // Девятая всероссийская школа-конференция молодых учёных «КОМУ-2010». – Ижевск: Изд-во Физико-технический институт, 2010. – С. 30–31.
13. Ванюков, В. В. Нелинейность оптического пропускания и рассеяния лазерной мощности гидрозолем наноалмазов / В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, Г. М. Михеев, А. П. Пузырь, К. В. Пуртов, В. С. Бондарь // Девятая всероссийская конференция «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем». – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 20–23.
14. Vanyukov, V. V. Influence of nonlinear light scattering on optical limiting in carbon nanotube suspensions / V. V. Vanyukov, G. M. Mikheev, T. N. Mogileva, D. L. Bulatov, A. V. Okotrub // 14th international conference on laser optics «LO-2010». – Saint-Petersbourg, Russia, 2010. – P. 78.

15. Vanyukov, V. V. Application of nonlinear light scattering in nanocarbon suspensions for adjustment of laser pulse duration / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. V. Okotrub // Second international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics». – Polvijarvi, Finland: University of Eastern Finland, 2010. – P. 73.
16. Mikheev, G. M. Modernized Z-scan technique for investigation influence of nonlinear light scattering on optical limiting in nanocarbon suspensions / G. M. Mikheev, T. N. Mogileva, V. V. Vanyukov, D. L. Bulatov // Second international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics». – Polvijarvi, Finland: University of Eastern Finland, 2010. – P. 33.
17. Vanyukov, V. V. Optical limiting and nonlinear scattering in nanodiamonds hydrosol / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. P. Puzyr, K. V. Purtov, V. S. Bondar // International conference on coherent and nonlinear optics «ICONO 2013» / International conference on laser, applications and technologies «LAT 2010». – Kazan: Conference CD, 2010. – P. 36.
18. Ванюков, В. В. Влияние нелинейного рассеяния света на оптическое ограничение мощности в гидрозоле наноалмазов / В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, Г. М. Михеев, А. П. Пузырь // Третья международная конференция «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии». – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – С. 51–52.
19. Vanyukov, V. V. Optical limiting in aqueous suspensions of nanodiamonds / V. V. Vanyukov, G. M. Mikheev, T. N. Mogileva, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // The 46th annual meeting of the finnish physical society «Physics day». – Joensuu, Finland: University of Eastern Finland, 2012. – P. 48.
20. Vanyukov, V. V. Optical limiting in nanodiamond suspensions / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // Third international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics». – Polvijarvi, Finland: University of Eastern Finland, 2012. – P. 34.
21. Mikheev, G. M. Nonlinear light scattering in nanocarbon suspensions / G. M. Mikheev, V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva // Third international workshop «Nanocarbon photonics and optoelectronics». – Polvijarvi, Finland: University of Eastern Finland, 2012. – P. 28.
22. Vanyukov, V. V. Optical limiting in suspensions of nanodiamonds and pulse duration control / V. V. Vanyukov, G. M. Mikheev, T. N. Mogileva, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // Fourth international conference «Nanocon». – Brno, Czech Republic: Tanger, 2012. – P. 85-86.
23. Vanyukov, V. V. Optical limiting properties of detonation nanodiamond suspensions / V. V. Vanyukov, G. M. Mikheev, T. N. Mogileva, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // 6th finnish-russian photonics and laser symposium «PALS'13», – Kuopio, Finland: University of Eastern Finland, 2013. – P. 34.

Подписано в печать 20.11.2013 г. Формат 60х84/16
 Бумага «Mondi». Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,2.
 Тираж 130 экз.

Отпечатано в Институте механики УрО РАН
 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34.